

論 文

헤테로다인 光通信 方式을 爲한 半導體 레이저의 周波數-出力 安定化에 關한 研究.

洪 玩 憲* 潘 在 景** 朴 漢 奎**

A Study on the Frequency-Output Power Stabilization of Semiconductor Laser for Heterodyne Optical Communication Systems

Woan Hue HONG*, Jae Kyung PAN**, Han Kyu PARK** *Regular Members*

要 約 本 論文에서는 半導體 레이저를 使用하여 헤테로다인 光通信 方式을 具現시키기 爲하여 必要한 半導體 레이저의 發振周波數 安定化 시스템을 이제까지의 周波數 安定化만을 考慮한 方式에서 光出力 安定化를 爲한 歸還回로를 追加 하므로서 既存의 周波數 安定化만을 考慮한 方式에서보다 周波數 安定度를 約 5 倍 改善시켰다.

ABSTRACT In this paper, a new method is suggested to stabilize the frequency of semiconductor laser diode for heterodyne optical communication systems. In order to stabilize the frequency of semiconductor laser, the method of the injection current control has been widely used, in which the laser frequency is locked to a F-P interferometer. By adding another servoloop to stabilize the output power of semiconductor laser, we could stabilize the laser frequency and the output power simultaneously and the frequency stability is improved by a factor of five times.

1. 序 論

오늘날 꿈의 通信으로 알려진 光通信은 現在 IM/DD(Intensity Modulation/Direct Detection) 方式이 널리 쓰이고 있으나 單一 波長의 半

導體 레이저 및 SPSM(Single Polarization Single Mode) 光纖維에 對한 研究가 活潑히 進行됨에 따라 受信感度を 20dB 以上 增大시킬 수 있고 FDM(Frequency Division Multiplexing) 이 可能한 헤테로다인 光通信 方式이 未久에 活用되어질 展望이다⁽¹⁾⁻⁽³⁾.

헤테로다인 光通信 方式은 中間 周波數를 選定 하여야 하므로 LO(Local Oscillator)를 必須的으로 使用하여야 하며 LO의 周波數 特性이 대단히 重要하다. 普通 使用하는 中間 周波數가 0.2~2 GHz 內에 있으므로, 이는 搬送 周波數가 200THz 에 比할 때 10^{-5} ~ 10^{-6} 倍에 該當하므로 發振 周波數의 安定은 대단히 深刻한 問題이

* 서울市立大學 電子工學科
Dept. of Electronics, Seoul City University, Seoul
132, Korea.
** 延世大學校 工科學 電子工學科
Dept. of Electronics, Yon-Sei University, Seoul 120,
Korea.
論文番號: 86-21(接受 1986. 5. 22)

다. 自由動作 條件下에서 半導體 레이저의 發振 周波數는 半導體 레이저의 溫度와 供給 電流의 變化에도 대단히 敏感하다. 半導體 레이저의 溫度가 減殺하든가 電流가 減殺하면 半導體 레이저의 發振 周波數는 높은 周波數 쪽으로 繼續變하고 發振모드가 달라진다^{(4)~(9)}.

半導體 레이저의 周波數를 安定化시키는 方式으로는 Na, Ba, ArI, KrI가스의 Optogalvanic 信號에 固定시켜 安定化시키는 方式, CH₄, H₂O, Cs, Rb 등과 같은 分子나 原子의 吸收 스펙트럼에 固定시켜 安定化시키는 方式 및 F-P(Fabry-Perot) 干涉計를 使用하여 安定化시키는 方式들이 있다^{(4)~(9)}. 前者의 두 方式은 使用 半導體 레이저의 發振周波數 領域이 빠뎀에 따라 分子나 原子를 다시 찾아야 隘路點이 다르므로 本研究에서는 세번째 方式인 F-P干涉計를 使用하여 어느 素子나 손쉽게 安定을 이루도록 하였다.

F-P干涉計를 利用하여 半導體 레이저의 周波數를 安定化시키는 方式은 1970年 Bykovskii에 依해서 처음 試圖 되었으며⁽⁸⁾, 1980年 Okoshi는 F-P干涉計를 使用한 二重 溫度 調節 歸還 方式에 對하여 研究하였고⁽⁹⁾, 같은 해 Favre는 F-P干涉計를 使用한 電流 調節 歸還方式에 對하여 發表하였다⁽¹⁰⁾. Tsuchida와 Tako등도 1981年 F-P干涉計를 使用하여 周波數 安定化시킨 半導體 레이저의 周波數 安定度를 Allan Variance에 依하여 分析 體系를 잡았다^{(11)~(14)}.

이제까지 F-P干涉計를 周波數 辨別器로 한 周波數 安定化 시스템은 光出力의 變化가 周波數 變化에 比하여 無視할 수 있을 만큼 작다는 假定 하에 光出力을 基準으로 F-P干涉計의 出力을 差動增幅하여 注入 電流에 歸還시키므로써 周波數 安定化를 이루어 왔다. 그러나 周波數安定化 時에도 光出力은 微細하나마 드리프트하는 特性을 나타낸다. 따라서 本研究에서는 이로 인한 半導體 레이저의 發振周波數 安定度 低下를 改善하기 爲하여 F-P干涉計를 使用한 半導體 레이저의 周波數 安定化 시스템에 光出力을 安定化시키기 爲한 出力 安定化 歸還回路를 附加하므로써 半導體 레이저의 出力 및 發振 周波數를 同時에 安定化 시켰다.

2. F-P干涉計를 利用한 半導體 레이저의 出力 및 周波數 同時 安定化 原理.

그림 1은 本 研究에서 시도한 半導體 레이저의 出力 및 周波數 安定化 시스템의 概略圖이다. 먼저 溫度에 따른 周波數 安定化를 爲하여 熱電素子和 制御回路를 利用하여 一定溫度로 維持하며, 電流에 따른 周波數 安定化를 爲하여 定電流源을 構成 一定 電流를 供給한다.

그러나 이때 構成한 恒溫器 및 定電流源은 完璧한 것이 아니어서 發振 周波數 및 出力의 드리프트 現象이 나타나므로 이들 變動量 사이의 相關關係를 살펴 보기로 하자. 動作電流 I₀와 動作溫度 T₀ 周邊에서의 注入電流 變化分 ΔI와 動作溫度 變化分 ΔT에 對한 半導體 레이저의 周波數 變化分 ΔF 및 出力 變化分 ΔP가 식(1)과(2)로 表現된다.

$$\Delta F = \left(\frac{\partial F}{\partial I} \right)_{T_0} \Delta I + \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_{I_0} \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial I} \right)_{T_0} \Delta I + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{I_0} \Delta T \quad (2)$$

여기서 약간의 溫度 變化分 ΔT에 依한 周波數 變動은 注入電流에 誤差信號를 歸還시켜 較正한다. 周波數가 安定을 이룬 後 即 ΔF = 0 일때 出力 變化分 ΔP를 求하면 식(3)과 같다.

$$\Delta P = \left\{ - \left(\frac{\partial P}{\partial I} \right)_{T_0} \times \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_{I_0} / \left(\frac{\partial F}{\partial I} \right)_{T_0} + \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{I_0} \right\} \Delta T \quad (3)$$

出力 感知端에서 이들 變動에 相當하는 誤差信號가 檢出되면 溫度 調節回路에 歸還시켜 出力을 安定시킬 수 있다. 따라서 그림 1의 構成圖에서 보듯이 半導體 레이저의 빔은 分光器 BS₁을 거쳐 兩分된 後, 하나는 分光器 BS₂에 依해 다시 兩分되어 受光素子 PD₁에 受信되어 差動增幅器 A₁의 入力으로 들어가 基準이 되고 또 하나는 F

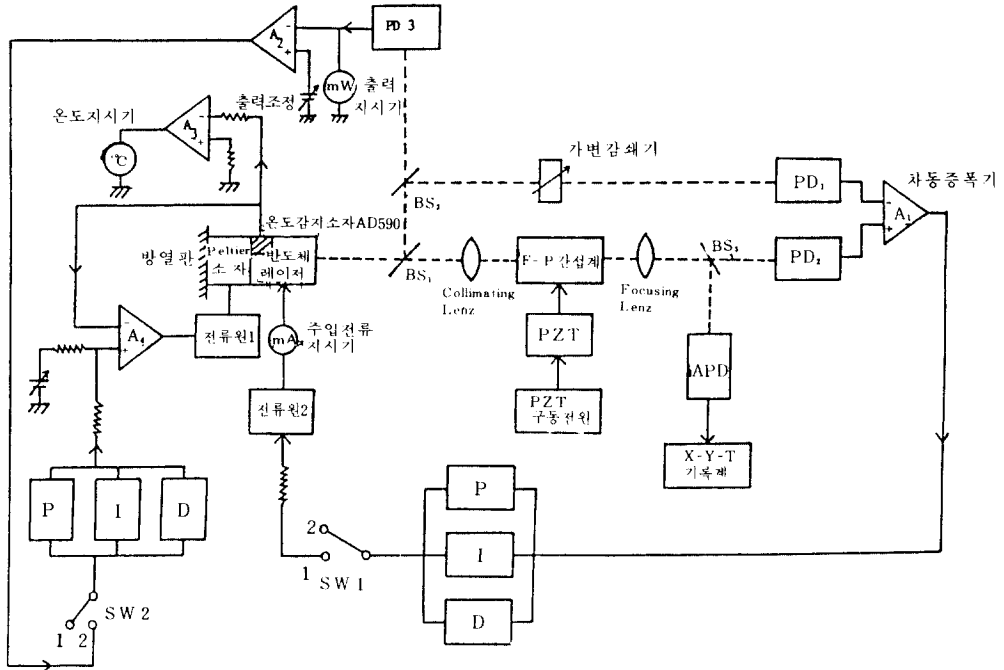


그림 1 F-P간섭계를 사용한 반도체 레이저 주파수-출력 안정화 시스템 실험장치
Experimental setup for measurement the characteristic of both frequency and output power stabilized semiconductor laser using F-P interferometer.

-P干涉計를 거쳐 周波數辨別된 後 受光素子 PD₂에 受信되어 差動增幅器 A₁의 또다른 入力으로 들어가 誤差信號를 얻게 된다. 이때 F-P干涉計의 周波數에 따른 出力 特性은 식(4)와 같다.

$$\frac{I_T}{I_0} = \left[1 + \frac{4R}{(1-R)^2} \sin^2 \frac{2\pi fd}{c} \right]^{-1} \quad (4)$$

여기서 I₀는 入射光의 세기, I_T는 出力光의 세기, R는 거울의 反射率, f는 光周波數, d는 거울의 間隔, c는 光速이며, 단 F-P干涉計를 構成하는 거울內 媒介物質은 空氣이며, 入射角은 0° 吸收率은 0이라 假定하였다. 또한 F-P干涉計의 自由 스펙트럼 領域은 식(5)와 같다.

$$FSR = \nu_{N+1} - \nu_N \approx \frac{c}{2nd} \quad (5)$$

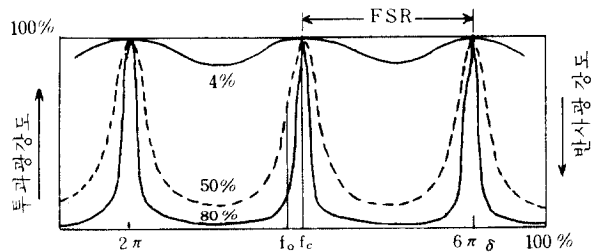


그림 2 반사율에 따른 F-P 간섭계의 출력특성
F-P interferometer characteristic of output power to reflectivity.

거울의 反射率 R 값에 따라 F-P干涉計의 出力 特性曲線을 그려보면 그림 2와 같이 된다. 이때 通過帶域 f_c를 F-P干涉計의 位置 變更 素子 PZT를 利用하여 그림 2에서와 같이 最大 기울기를 갖는 지점에 레이저 出力 周波數 f₀가 오게끔 맞추어 준다. 이때 差動增幅器의 入力 V₁과 V₂에 依해서 얻어지는 差動增幅器의 出力은 식(6)과 같다.

$$V_0 = G(V_1 - aV_2) \quad (6)$$

여기서 G 와 a 는 常數이므로 이 信號는 半導체 레이저의 注入電流에 歸還되어 調節되고 이 歸還信號가 0이 되면 즉 $V_1 = aV_2$ 이면 歸還量이 0이 되어 發振 周波數 f_0 는 固定 周波數에 머물게 된다. 周波數가 安定을 이루는 過程에서 發生된 出力 變化分은 受光素子 PD₃에 受信되어 一定出力 維持 制御回路를 거쳐 溫度調節回路에 歸還되어 레이저 溫度를 調節시켜 줌으로 出力 安定을 이룬다.

3. 實驗 및 結果 考察

1. 自由動作 半導체 레이저의 特性實驗

自由動作 半導체 레이저의 發振特性實驗을 爲한 系統圖는 그림 3 과 같다. $\pm 2\text{ m}^\circ\text{K}$ 내에서 安定된 溫度調節回路¹⁵⁾ 및 定電流 電源供給器에 依해서 溫度와 電流를 設定하여 半導체 레이저를 動作시킨다. 半導체 레이저로 부터 나온 빔은 두 개의 빔으로 나뉘어 하나는 出力 指示器에 依해서 出力 特性을 測定하며, 또 하나의 빔은 쇼커를 통해서 스펙트로메타(SPEC 1702)로 들어가

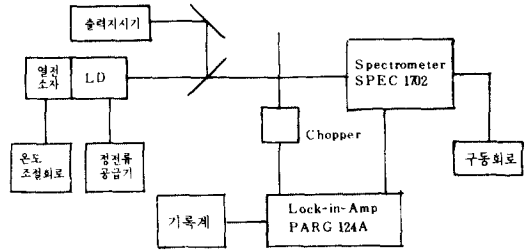


그림 3 반도체 레이저의 발진특성 실험계통도
Block diagram for measurement of semiconductor laser oscillation characteristics.

그레이팅에 依해서 分析된 後 그 出力이 Lock-in-Amp(PARG 124A)로 增幅되어 發振周波數 特性이 X-Y 記錄計에 記錄되어 測定된다. 自由動作 半導체 레이저의 發振特性을 測定하기 爲하여 注入電流를 75mA에 固定시킨 後 恒温器의 溫度를 10 $^\circ\text{C}$ 에서 30 $^\circ\text{C}$ 까지 變化시켜 溫度에 對한 發振周波數 및 出力 特性을 實驗하였으며 結果는 그림 4와 같다. 17 $^\circ\text{C}$ 75mA 附近에서 溫度에 따른 周波數 變化 特性은 $-13.12\text{ GHz}/^\circ\text{C}$ 로 變하였고, 出力 特性은 $45\mu\text{W}/^\circ\text{C}$ 로 變하였다. 注入電流에 따른 發振周波數 및 出力 特性을 보기 爲하여 溫度를 17 $^\circ\text{C}$ 에 固定시킨 後 注入電流를 60

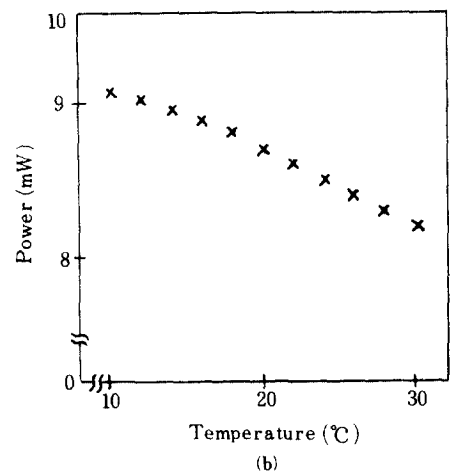
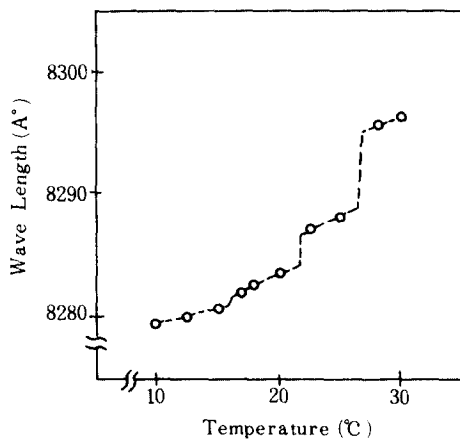


그림 4 반도체 레이저의 주파수-온도, 출력-온도특성곡선
(a) 주파수-온도특성 (b) 출력-온도특성
Experimental results of frequency and output power versus temperature. (a) Frequency-temperature (b) Output power-temperature.

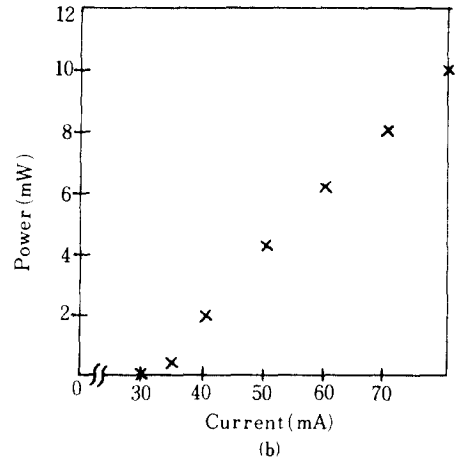
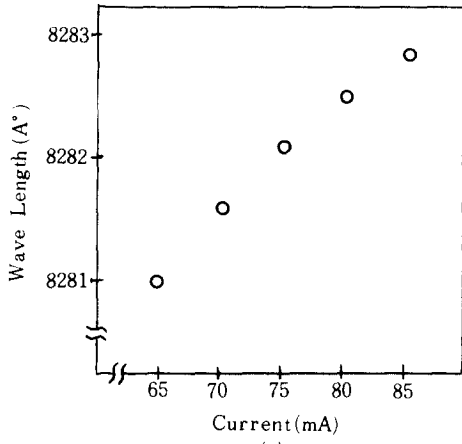


그림 5 반도체 레이저의 주파수-전류, 출력-전류 특성곡선
 (a) 주파수-전류특성 (b) 출력-전류 특성
 Experimental results of frequency and output power versus current.
 (a) Frequency-current (b) Output power-current.

mA에서 85mA까지 변화시킨 결과 그림 5와 같다. 電流에 따른 周波數 및 出力 特性은 17°C 75 mA 附近에서 各各 - 3.94GHz / mA, 198μW / mA로 變하였다.

2. F-P 干涉計를 使用한 出力 및 周波數 同時 安定化 시스템 實驗.

그림 1의 F-P 干涉計를 使用한 半導體 레이저의 出力 및 周波數 同時 安定化 시스템의 實驗 裝置는 사진 1과 같다. 實驗에 使用한 半導體 레이저는 Hitachi社의 CSP 레이저인 HLP 1600

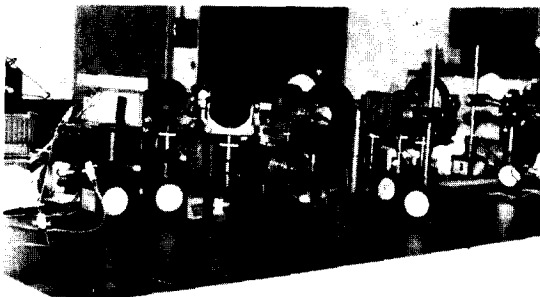


사진 1 반도체 레이저의 주파수-출력 안정화 시스템 특성 실험 장치
 Experimental setup for measurement the characteristics of frequency-output power stabilized semiconductor laser.

이다. F-P 干涉計는 圓筒型으로 兩面の 反射鏡은 알루미늄을 蒸着시킨 反射率 85%를 使用하여 構成하였으며 自由 스펙트럼 領域은 10GHz로 PZT (6 μm/1,000V)를 附着시켜 微細 調整할 수 있게 하였다. 受賣素子로 使用한 PIN포토 다이오드는 NEC社의 NDL1208을 APD는 NDL1202를 使用하였다.

出力-周波數 同時 安定化는 周波數 安定된 狀態에서 出力 誤差 信號를 溫度 調節回路에 歸還

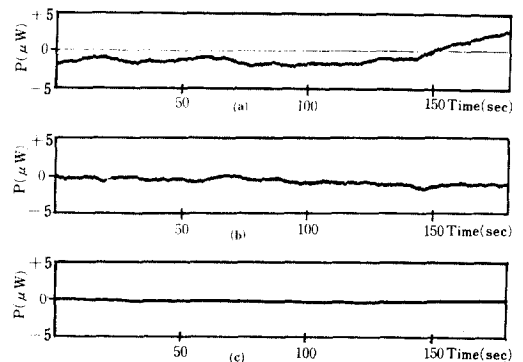


그림 6 출력 드리프트 특성곡선. (a) 자유동작시 (b) 주파수 안정시 (c) 주파수-출력안정시
 Output power drifts of (a) free running (b) frequency stabilized (c) frequency-output power stabilized state.

制御하므로써 레이저의 發振周波數와 出力을 同時에 安定시킬 수 있다. 그림 6은 自由動作時, 周波數 安定時, 出力-周波數 同時 安定時에 對한 半導體 레이저의 出力 安定度를 보여 주고 있다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 出力-周波數 同時 安定時的 出力 드리프트는 $1 \mu W$ 미만으로 自由動作時的 出力 드리프트 $6 \mu W$ 보다 대단히 安定됨을 볼 수 있다.

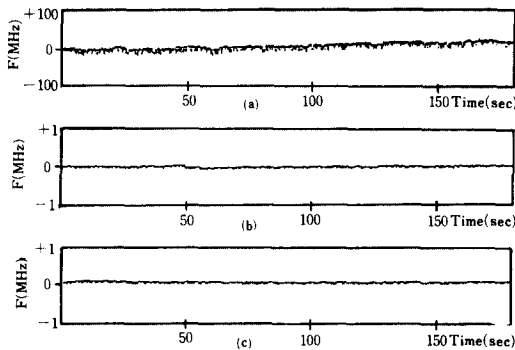


그림 7 주파수 드리프트 특성고선 (a) 자유동작시 (b) 주파수 안정시 (c) 주파수-출력안정시
Frequency drifts of (a) free running (b) frequency stabilized (c) frequency-output power stabilized state.

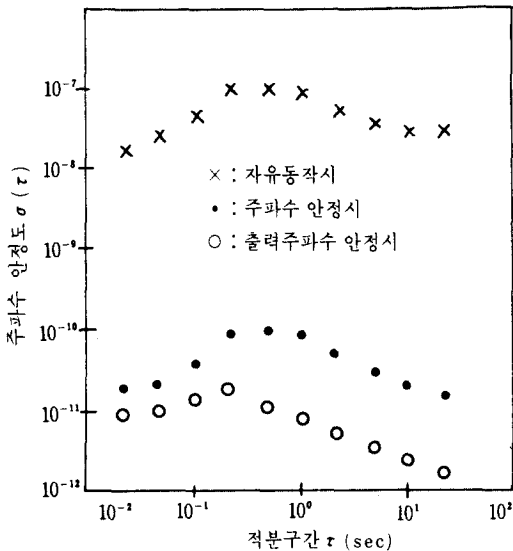


그림 8 자유동작시, 주파수 안정시 및 출력-주파수 안정시의 주파수 안정도 실험치
Experimental values of frequency stability for free running state, frequency stabilized state and frequency-output power stabilized state.

그림 7은 自由動作時, 周波數 安定時, 出力-周波數 同時 安定時에 대한 반도체 레이저의 周波數 安定 狀態를 보여주고 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 出力-周波數 同時 安定時的 周波數 드리프트는 自由動作時보다 대단히 安定됨을 볼 수 있다. 이를 좀 더 定量的으로 알아보기 爲하여 Allan variance의 제곱근 $\delta(Z)$ 를 誤差 信號로 부터 計算하였다. 그림 8은 自由動作時, 周波數 安定時, 出力-周波數 同時 安定時的 半導體 레이저 周波數 安定度를 나타낸다.

出力-周波數 同時 安定時的 周波數 安定度 $2.1 \times 10^{-12} < \delta(Z) < 3 \times 10^{-11}$ 은 自由動作時的 周波數 安定度에 比해서 10^3 배 以上 改善되었고, 周波數만 安定시킨 境遇의 周波數 安定度에 比해서 5 배 以上 改善됨을 볼 수 있다.

4. 結 論

半導體 레이저를 使用하여 헤테로다인 光通信 方式을 具現시키기 爲하여 必要한 半導體 레이저의 發振周波數 安定化는 恒溫器와 定電流 電原 供給器만으로는 充分히 얻을 수 없다. 따라서 F-P 干涉計를 周波數 辨別器로 使用하여 周波數 變化에 따른 F-P 干涉計의 出力變化를 誤差 信號로 檢出하여 注入 電流에 歸還 制御하므로써 周波數 安定化를 이루었으며 특히 本研究에서는 周波數 安定時的 半導體 레이저의 出力을 安定化 시키기 爲한 出力 安定化 歸還回路를 附加하여 出力과 周波數를 同時에 安定시켰을 뿐 아니라, 周波數 安定度를 더욱 改善하였다.

本 論文은 韓國科學財團의 研究費에 依하여 行하여진 論文입니다.

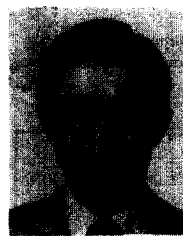
參 考 文 獻

- (1) T. Kimura and Y. Yamamoto, "Review progress of coherent optical fibre communication systems," Optical and Quantum Electronics, vol. 15 pp.1-39, 1983.
- (2) T. Okoshi, "Recent progress in heterodyne/coherent optical fiber communications," JLT, vol. LT-2, no. 4, pp. 341-346, Aug. 1984.

- (3) E. E. Basch and T. E. Brown, "Introduction to coherent optical fiber transmission," IEEE. Communication Magazine, vol. 23, no. 5, pp. 23-30, May 1985. . .
- (4) S. Yamaguchi and M. Suzuki, "Frequency stabilization of a diode laser by use of the optogalvanic effect," Appl. Phys. Lett., vol. 41, no. 7, pp. 597-598, Oct. 1982.
- (5) T. Yabuzaki, A. Ibaragi et al., "Frequency locking of a GaAlAs laser to a doppler free spectrum of the Cs-D₂ line," Japan. J. Appl. Phys., vol. 20, no. 6, pp. L451-L454, June 1981.
- (6) H. Tsuchida, M. Ohtsu et al., "Frequency stabilization of AlGaAs semiconductor Laser based on the Rb-D₂ line," Japan. J. Appl. Phys., vol. 21, no.9, pp. L561 L563, Setp. 1982. 1
- (7) H. Hori, Y. Kitayama et al., "Frequency stabilization of GaAlAs Laser using a doppler free spectrum of the Cs-D₂ line," IEEE. J. QE, vol. QE-19, no. 2, pp. 169-175, Feb. 1983.
- (8) Y. A. Bykovskii, V. L. Velichanskii, I. G. Goncharov and V. A. Maslov, "Frequency stabilization of a GaAs injection laser by Means of an external fabry-perot Resonator," Soviet Phys. JETP., vol. 30, no. 4, pp. 605-606, April 1970.
- (9) T. Okoshi and K. Kikuchi, "Frequency stabilization of semiconductor lasers for Heterodyne type optical communication systems," Electronics Letters, vol. 16, no. 5, pp. 179-181, Feb. 1980.
- (10) F. Favre and D. L. Guen, "High frequency stability of laser Diode for heterodyne communication systems," Electronic Letters, vol. 16, no. 18, pp. 709-710, Aug. 1980.
- (11) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako, "Frequency stabilization of AlGaAs DH lasers," Japan. J. Appl. Phys., vol. 20 no. 6, pp. L403-L406, June 1981.
- (12) H. Tsuchida, M. Ohtsu and T. Tako, "Improvements in the short term frequency stability of AlGaAs DH laser," Japan IECE, vol. E. 65, no. 1, pp. 65-66, Jan. 1982. W E
- (13) D.W. Allan, "Statistics of atomic frequency standards," proc. IEEE, vol. 54, no. 2, pp. 221-230, Feb. 1966.
- (14) J. A. Barnes, A. R. Chi et al., "Characterization of frequency stability," IEEE IM., vol. IM-20, 2, pp. 105-120, May 1971.
- (15) 홍완희, 임명섭, 박한규, "헤테로다인 검파방식을 이용한 광통신 시스템에 관한 연구 (LD의 주파수 안정화를 위한 항온기 설계에 관하여)", 한국통신학회지 제10권, 제4호, pp. 168-174, 1985. 8.



洪玩憲(Woan Hue Hong) 正會員
 1949年7月26日生
 1969. 3~1973. 2 崇田大學校電子工學
 科卒業(工學士)
 1973. 3~1975. 2 延世大學校 大學院
 電子工學科 卒業(工
 學碩士)
 1982. 3~1986. 2 延世大學校 大學院
 電子工學科 卒業(工
 學博士)
 1975. 9~1979. 9 空軍士官學校 電子
 工學科 專任講師
 1979. 10~現在: 서울市立大學 電子工學科 副教授



朴漢奎(Han Kyu PARK) 正會員
 1941年6月21日生
 1964年2月: 延世大學校電氣工學科卒業
 1968年2月: 延世大學校大學院電氣工學
 科卒業(工學碩士)
 1973年: 불란서 파리대학교(소르본느대
 학교) 博士課程修了(DEA)
 1975年: 불란서 파리6대학(ph. D)
 1976年~現在: 延世大學校工科大学電子
 工學科教授



潘在景(Jae Kyung PAN) 正會員
 1956年2月19日生
 1976. 3~1980. 2 延世大學校電子工學
 科卒業(工學士)
 1980. 3~1982. 2 延世大學校 大學院
 電子工學科(工學碩士)
 1982. 9~現在: 延世大學校 大學院 電
 子工學科 博士課程